卒業研究報告

題目

電動自転車の設計と製作

報告者

学籍番号：1140164

氏名：　村上　弘吉

指導教員

星野　孝総

指導教員補佐

山本利水　　杉田彰久

平成 27 年 2 月 16 日

高知工科大学　システム工学群　電子工学専攻

目次

第一章　背景と目的

第二章　構想設計
- 2.1　自転車走行のエネルギー分析
- 2.2　実測検証
- 2.3　車体の選定
- 2.4　動力の伝達系
- 2.5　モータの目標スペック・入手経路とモータの選定
- 2.6　電池の選定

第三章　モータについての調査・予備実験
- 3.1　様々なモータ
- 3.2　ブラシレスモータの駆動原理
- 3.3　予備実験１（ホールセンサを用いない駆動実験）
- 3.4　予備実験２　（小型ブラシレスモータの実験）

第四章　手巻きで作成したモータ
- 4.1　材料一覧
- 4.2　モータの手作り工程
- 4.3　ホールセンサユニット
- 4.4　インバータ回路

第五章　制御基板回路構成と基板
- 5.1　概要
- 5.2　組み立てたプリント基板
- 5.3　マイコンボードの機能と役割
- 5.4　制御ソフトの機能

第六章　自作モータの性能試験
- 6.1　DC モータの等価回路と静特性
- 6.2　トルク特性試験

第七章　車体への取り付け
7.1　構造設計
7.2　製作過程

第八章　車体試験
8.1　起動トルク試験
8.2　走行試験

第九章　まとめ
9.1　評価と課題
9.2　習得できたこと

謝辞

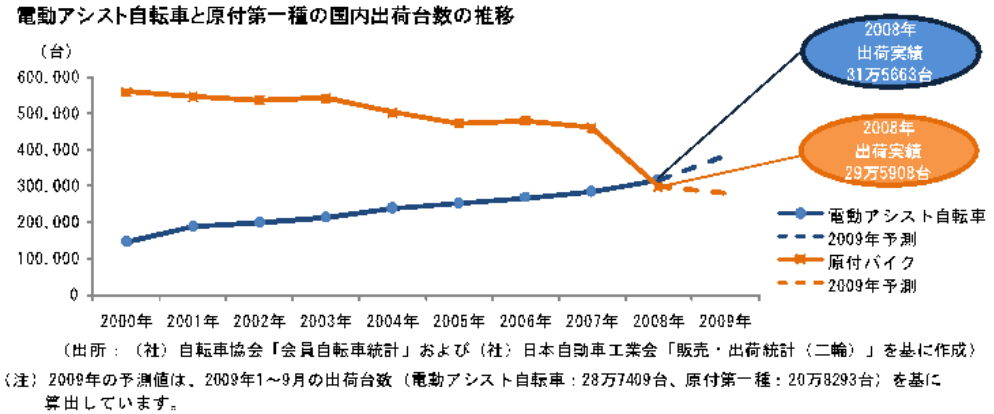
参考文献

第一章　背景と目的

今日，世界中でエネルギーや燃料の消費が年々急増している．特に中国や，インド，ブラジルなどの発展途上国では，人口が多いうえに人々の多くが先進国のような暮らしを望み，また生活水準の向上のために化石燃料を大量に消費している．また発電所の電気の供給が追い付かず，停電することが頻繁にある．また，同時に石油や石炭の消費量も急増し，一時は原油が一バレル 150 ドルにまで達した．最近では政治的問題でシェールガスに対抗するために原油の生産量が急増し，原油の価格が下落，さらに燃費の良くないスポーツカーが人気車種となりつつある．ここまで来ると，現在の我々学生が生きている間に化石燃料の枯渇は避けられない．

そこで，車等の移動手段がガソリンなどの化石燃料から，風力や太陽光などの自然エネルギーなどからでも簡単に生成することのできる電気を用いるようになるのは自然の流れであるといえる．また近年の日本ではハイブリッド車や低燃費の車が常に売上台数のトップ 10 の中に入っている．さらにある国内大手自動車メーカーではバッテリー式の電気自動車が販売されるようになり，街中でたまに見かけるようになった．また別の国内自動車メーカーではガソリンで発電して走ることもできる自動車を販売し，一定の人気を得ている．また国内最大手自動車メーカーではハイブリッド車の研究開発から販売まで行い，世界中に低燃費の自動車が販売されるきっかけを作った．また最近では水素で走る電気自動車の販売も開始した．また，海外でもベンチャー企業が電気自動車の販売を開始した．デザイン性に優れ，エコであることからセレブ層での人気があるという．

また昨年では図 1-1 のように電動アシスト自転車が原付バイクの売り上げ台数を初めて上回るという事態が発生した．これも近年のエコブームの影響の一つと言える．なお，原付バイクとは異なり，免許がいらない点や，維持費も考慮しなければならない．それでも，近年のバッテリー技術の向上や，モータの性能の向上も視野に入れる必要があるのも事実である．



（出所：（社）自転車協会「会員自転車統計」および（社）日本自動車工業会「販売・出荷統計（二輪）」を基に作成）
（注）2009年の予測値は、2009年1～9月の出荷台数（電動アシスト自転車：28万7409台、原付第一種：20万8293台）を基に算出しています。

図 1-1　電動アシスト自転車と原付バイク

そこで，電気自動車や電気アシスト自動車を製作したいという流れになる．しかし，電動自転車は設計が複雑かつ，様々な機械的な知識が要求される．また電動アシスト自転車では，モータを回転させるだけではなく，人間側の入出力に対応して出力を変化させる必要があり制御が複雑である．また，電動アシスト自転車では，モータの出力とは別に人間の出力のみでも動かせるようにしなければならないと法律で定められている．このため，電動アシスト自転車は構造が複雑になる．そのため，構造が単純でありながらもモータやバッテリーの働きや，回路の働きを勉強できるものを製作するのが望まれた．そこで自分でも実際に作成することのでき，かつモータの働きや回路の制御を勉強することのできる電気自転車の試作を行うことにした．また，私の就職先が小型モータを扱う企業でもあるのも今回の研究の内容を選んだ理由でもある．

第二章　構想設計

2.1）自転車走行のエネルギー分析

今回，電動自転車を製作するにあたって重要なのが，どれほどブラシレスモータの性能が必要であるかを知ることである．そこで，電動自転車を製作する前に，実際の自転車ではどれほどの出力を必要とするかを知ることが求められる．そこで，自転車（推定 20kg）が人を一人（60kg）乗せて 2km/h　出すのに必要な出力を調べた．

まず，自転車にかかる抵抗を考える．これは，転がり抵抗（*Fr*），空気抵抗（*Fd*）　の 2 つが考えられる．

まず，転がり抵抗は日本自動車タイヤ協会（JATMA）の転がり抵抗の資料によるとタイヤの転がり抵抗はタイヤと地面の接地面の大きさが影響する．またタイヤの成分の多くがゴムだ．また次の図 2-1 からゴムの変形がエネルギーロスを生むのがわかる．

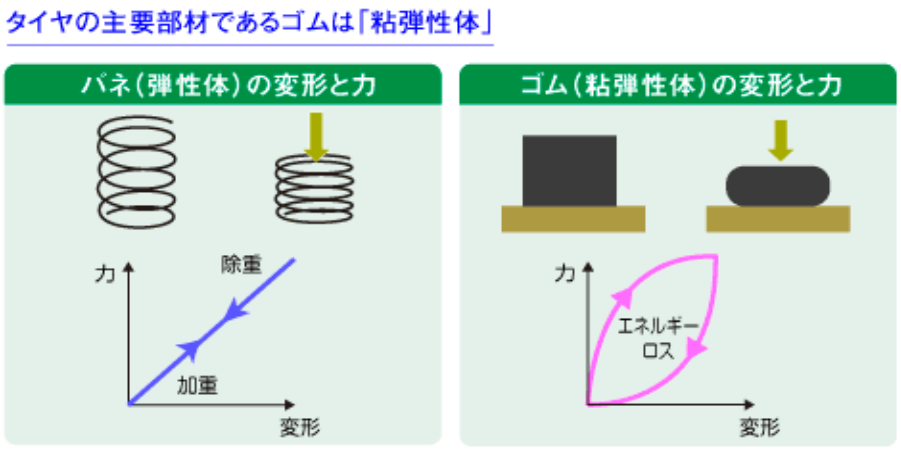


図 2-1　変形によるエネルギーロス

これは，タイヤの変形が転がり抵抗の 90%を占めるものだ．図 2-2，図 2-3 からわかるように主にタイヤの周方向，断面内の変形が影響を与える．

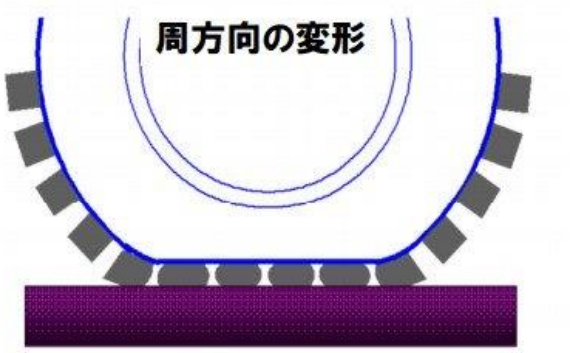


図 2-2　周方向タイヤの変形

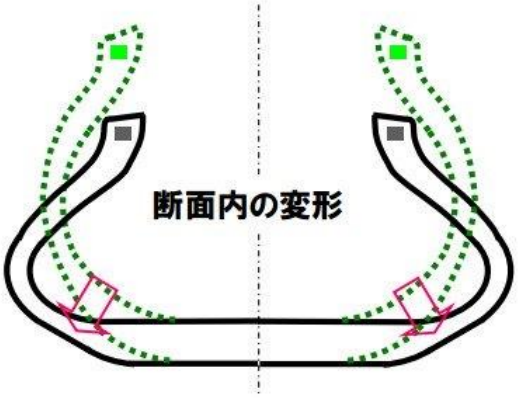


図 2-3　断面内のタイヤ変形

またママチャリは転がり摩擦係数（*Cr*）が参考文献[3]より 0.007～0.01 となる．このため，転がり摩擦係数を求める式が下の式となる．

$$Fr = 9.8 \times Cr \times m$$

式　転がり抵抗を求める式

（m は人も含む車体全体の重量）であるため，Fr＝7.84N となる．

次に空気抵抗について述べる．空気抵抗の式が下の式となる．ρ は空気密度(kg/m^3)，A は全面投影面積(m^2)，v は速度（m/s）となる，

$$Fd = \frac{1}{2}\rho Cd \times A \times v^2$$

式　空気抵抗を求める式

また ρ は気温が 30 度の時の 1.15kg/m^3とした．また Cd は普通の状態では 0.9～1.1 であるため，1.1 とした．また v は 5.6m/s（約 20km/h）とした．また A は概算で 1.0 とした．これによって，空気抵抗は 19.84N となる．また，次式よりこの自転車が 20km/h で走るのに必要な力は 27.78N となる．

$$F = Fr + Fd$$

式　自転車走行に必要なエネルギー

2.2）　実測検証

今回使った自転車に大人が乗り 1m/s（3.6km/h）で走るに必要な力は約 17.6N だった．車輪の半径は約 0.33m だから車輪の回転トルクは 5.8N となる．
20km/h なら 32Nm なり，理論値に近い結果となり妥当といえる．

2.3）　車体の選定（最も安価なママチャリを選んだ）

今回は手軽に電動自転車を製作するのがコンセプトであったため，図 2-4 のように，実際に販売されている中古のママチャリを採用した．

図 2-4　ベース自転車

2.4）　動力の伝達系

車体自体に変速機構が無いため，モータと後輪との間に変速機を入れるのが望ましいが，時間的制約もあって図 2-5 の構造とした．P1:P2＝5.4:1 となった．

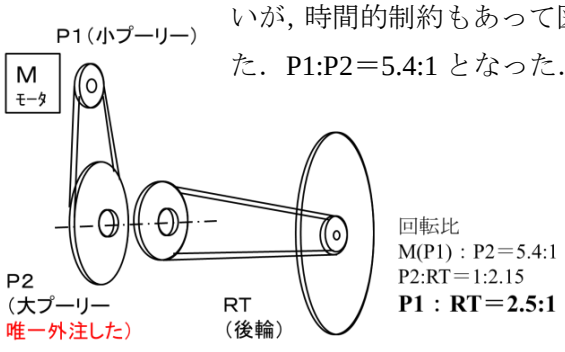


図 2-5　動力の伝達系

2.5）　モータの目標スペック・入手経路とモータの選定

エネルギー分析をした結果モータからの出力トルクは最低でも 27.78N は必要である．また，動力機構での摩擦や熱によるロスを考慮しなければならない．このため，少なくとも 20km/h で走行する場合，約 200W クラスのモータが必要と判断した．
本研究では，モータの仕組みを理解するために，完成した既製品を使わず，巻線作業とその結線は自分でやりたかった．この目的に沿う候補をスミスやモノタローの通販サイトから調査したが適当なものが見つからず，最終的にトランジスタ技術に掲載された CQ 出版の部品キットを採用した．

2.6）　電池の選定

電動自転車に使用される電池についてはリチウムイオン電池とニッケル水素電池の 2 種類がある．リチウムイオン電池は，エネルギー密度が高く，メモリー効果がない（充電の継ぎ足しが可能）利点の一方，未解決の熱暴走問題など取り扱いが難しくまた高価である．

ニッケル水素電池は電池そのものが安定しており，また実績もあるので信頼性が高く，また比較的安価である．注意事項としては，メモリー効果を持つので，バラバラの条件下で使った電池の混用や，継ぎ足し充電を頻発することは避けなければならない．今回はコストが安く，安定性，信頼性の面からニッケル水素電池を採用した．
図 2-6 は電池ユニットである．

図 2-6　使用する電池ユニット

雑誌トランジスタ技術で紹介された「電動自転車レース KV-BIKE チャレンジ」の大会ルールでは，単三ニッケル水素充電池 40 本で駆動させる必要と決められている．
電池 40 本の接続方法に対する規定は無いが，48V という記述も出てくるので 40 本全てを直列接続している様だ．取扱説明書に 10 本以上の直列を警告しており，また最大放電電流値に関する記述が無いので，大会スポンサーでもある電池メーカーに問い合わせた．その結果，過電流保護対策が必要だとの指摘があり，20A のヒューズを入れることとした．また，

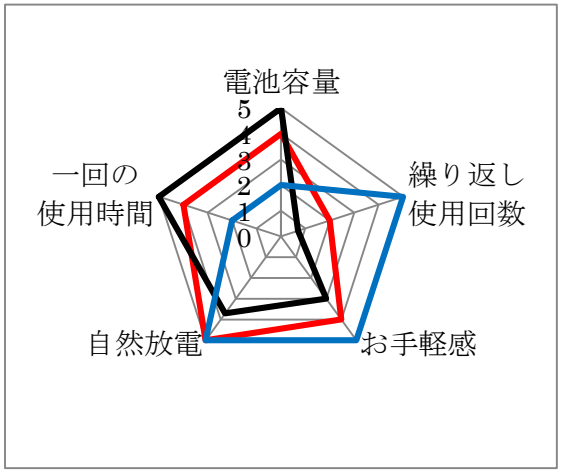
データを表 2-1 にまとめた.

１）単 3 の電池容量は約 2000mAh なので２A なら約 1 時間，４A なら 30 分使える.
　　放電電流値は２A 程度が望ましい.

２）40 個のバッテリーパックを製作する場合，20 個直列の 2 並列 OK かの確認
　　（車輪起動時は，モータが瞬間ロック状態になるから）

ブレーカやヒューズで過電流からの保護が必要・・・・・20A のヒューズを入れて対応.

表 2-1　単３充電式エボルタ（スタンダードモデル） BK-3MLE

項目	定格	3 種類の電池の比較 （赤：標準，黒：ハイエンド，青：お手頃）
公称電圧（V）	1.2	
定格容量（mAh）※	1950	
電池外形寸法（mm）	φ14.5×H50.5	
電池質量（g）	約 29	
くり返し使用回数	約 1800 回	
1 年後容量残存率	約 80%	

３章　モータについての調査・予備実験

3.1）　様々なモータ

モータの選定をする上で様々なモータの特徴を基礎知識として知る必要であるが，多義に渡るので少なくとも AC モータと DC モータ，ブラシ付きとブラシレス，インナーロータとアウターロータの違いは理解しておきたい.

AC モータは，交流電源で回転するモータで，回路構造が単純でブラシがないため長寿命という利点がある反面回転の細かな制御ができない弱点がある．図 3-1 は AC モータの代表例で左が斜溝型，右側が直溝型と呼ばれる.

DC モータは直流電源で回転するモータだが，流れる電流を機械的または電気的に切り替えさせる必要がある．整流子とブラシを接触させ機械的に切り替えるのがブラシ付きで構

造は単純だが消耗部品を有する弱点がある．安価なため玩具や短時間使用の用途に使われている．

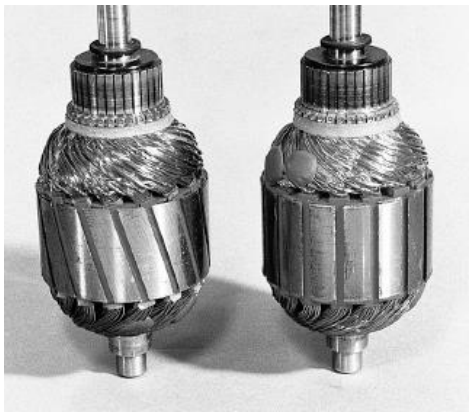


図 3-1　AC モータ例

図 3-2　DC モータ例

次にブラシレスモータは，DC モータと AC モータの両方の長所を持つので用途が拡大している．唯一の弱点とされる電流制御回路も専用 IC の登場やマイコンの導入で解消されつつあり，駆動電流の PWM 化によって精度の高い回転制御を省電力で行える様になった．詳しくは 3.2 で述べる．

ブラシレスモータにはインナーロータ型とアウターロータ型の 2 種類がある．
磁石の回転子がインナーロータ型では内側に，アウターロータ型では外側に配する構造となる．図 3-3　と図 3-4 にその構造を示す．

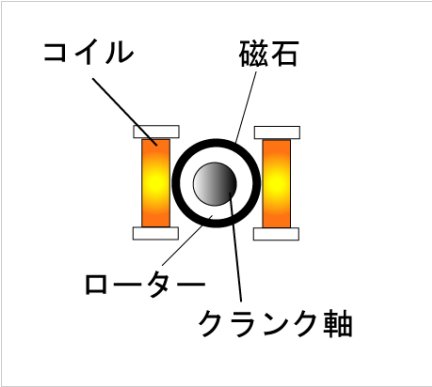


図 3-3　インナーロータ型

図 3-4　アウターロータ型

アウターロータ型のメリットは，回転軸の完成モーメントが大きく，磁石を小型化する必要がないうえに，コイルを巻くにも有利な構造をしている点である．

3.2）　ブラシレスモータの駆動原理

ブラシレスモータの駆動を理解するために，相数と極数の理解，トルク定数の求め方，巻き線の結線方法でスター結線とデルタ結線の違いについて述べる．

モータには必ず相数と極数があり，過去には 2 相モータもあったが今では 3 相モータが主流で，今回製作したモータも 3 相モータである．極数とはロータ側永久磁石の着磁パターンに現れる NSNS の数で必ず偶数になる．そして，ステータ巻線に発生する磁界の極数とロータの極数は一致しなければならない．しかし，集中巻の磁界は複雑なパターンになることがあり，その同極成分がロータと作用してトルクを発生させる．

ブラシレスモータはその歴史上において，発展途上の際に誘導モータのステータ巻線の考えを踏襲したことがある．誘導モータには分布巻と呼ばれる巻線を用いる．分布巻の図は上の図 3-1 のモータが正に分布巻の典型である．この場合の鉄心のスロット数 S と極数 2p，相数 m の間には次の式の関係がある．

$$S = q(2p)m$$

式　スロット数と極数，巻線の関係　q は係数

今回採用のモータは 12 極，3 相，スロット数は 18 だから係数は 0.5 となる．

結線には図 3-5 に示す様に，スター（Y）結線とデルタ（Δ）結線の 2 種類があり，大半はスター結線で用いられ，今回のモータもスター結線を採用した．

スター結線の利点は以下の 2 点とされる．

①結線作業がスター結線の方が楽，②第 3 調波が磁束分布に含まれているときはスター結線の場合には各相の第 3 調波が互いに打ち消しあう．

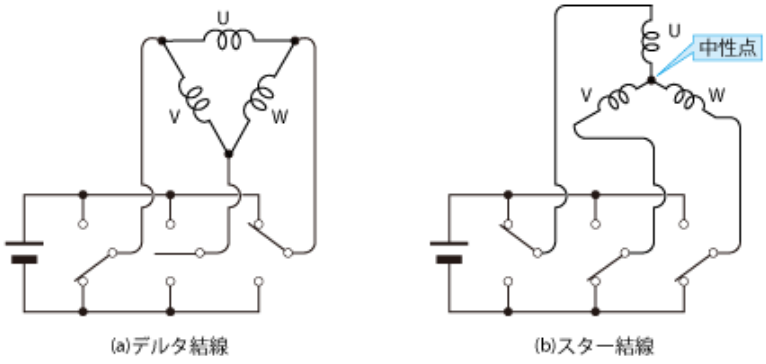


図 3-5　スター結線とデルタ結線

3.3）　予備実験１（ホールセンサを用いない駆動実験）

ブラシレスモータを回転させるには基本的にはホールセンサやコイルの逆起電力を計測する方法などでコイルと磁石（回転軸）の位置をはっきりさせる必要がある．しかし，強引ではあるが PWM 信号のみでブラシレスモータを回転させることができる．そこで，信号をプログラムで作成し，実験を行った．今回使用したプログラムの内，この実験に関する部分のみを図 3-6 に記載した．このプログラムは PORTC で FET の出力を指定する．また，

その時の出力の時間を遅延関数 delay_ms または delay_us で指定する．信号出力の詳細は後にあるブラシレスモータの駆動原理のとこで説明するため省略するが，ブラシレスモータの駆動させる信号と共に FET のスイッチングの時の短絡が発生するのを防ぐため，間で信号を出力しない時間（プログラム内では「PORTC＝0x00; delay_us(100);」）がある．

```
if (s==0x00)                    //
{
    for(;;)                     //無限ループ
    {
        PORTC=0x41;     delay_ms(5);
        PORTC=0x00;     delay_us(100);
        PORTC=0x42;     delay_ms(5);
        PORTC=0x00;     delay_us(100);
        PORTC=0x12;     delay_ms(5);
        PORTC=0x00;     delay_us(100);
        PORTC=0x14;     delay_ms(5);
        PORTC=0x00;     delay_us(100);
        PORTC=0x24;     delay_ms(5);
        PORTC=0x00;     delay_us(100);
        PORTC=0x21;     delay_ms(5);
        PORTC=0x00;     delay_us(100);
    }
}
```

図 3-6　ホールセンサなしでのプログラム

3.4　予備実験２　（小型ブラシレスモータの実験）

本番で使用するモータは 200W クラスと大きく，トルク測定には DC24V・30A 以上の安定化電源が必要で，これが研究室内に無い為，小型モータを用いてトルク測定の演習を行った．実験で使用したモータは TSUKASA 製　TG-22D．トルクの測定方法は図 3-7，図 3-8 に示すように, 回転軸に直接凧紐を巻き, 片方を固定しもう片方をバネ秤で計測した．

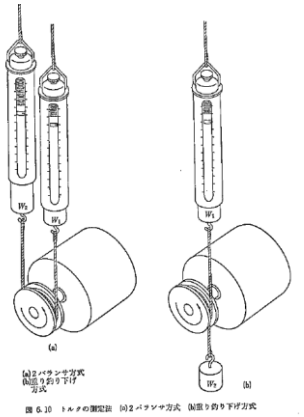


図 3-7　バネ秤によるトルク測定

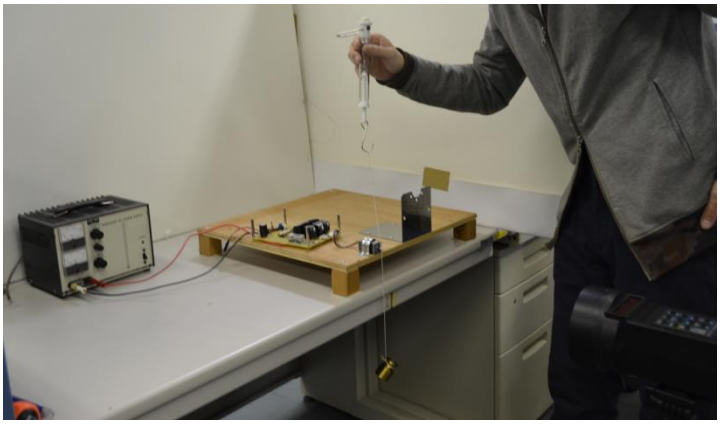


図 3-8　今回の予備実験風景

モータのトルク測定には，歪素子を用いたトルクメータが用いられるが，トルクメータが無い場合は，バネ秤を用いて簡易的に行うことが出来る．実験環境を表の 3-1 にまとめた．

表 3-1　実験環境

品名	メーカーと機種名	定格・性能	備考
使用したモータ	TSUKASA 製　TG-22D	12V　仕様	ギヤードモータ
DC 安定化電源	菊水電気　Model:PAB32-3	30V　3A	電流制限付き
ストロボスコープ	LINE-SEIKI　Model：SS-2000		
バネ秤		1 kg,	一部で 10 kg使用
分銅		200g	

この実験結果を図 3-9 に示す．

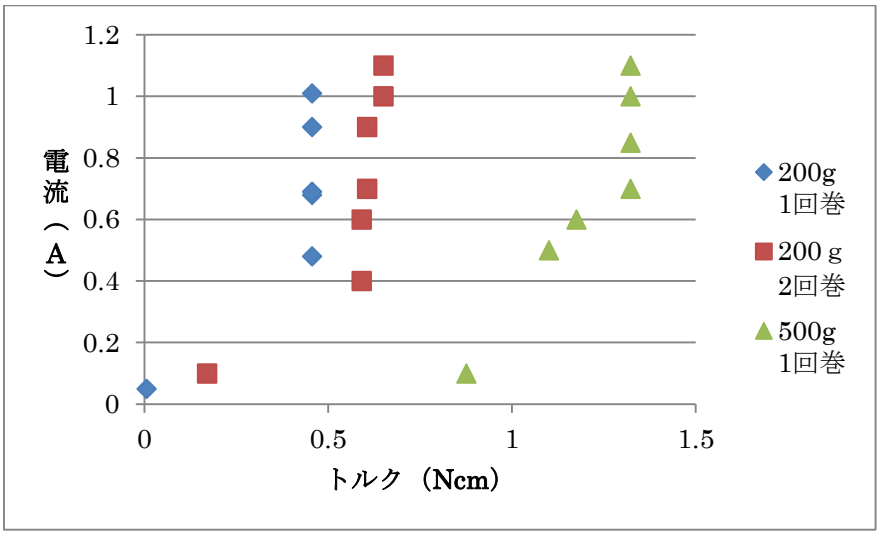


図 3-9　実験結果（トルク対電流）

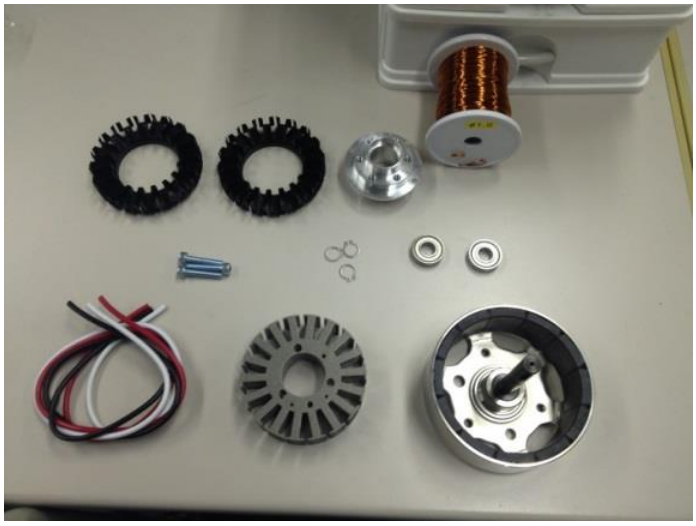
この結果より，今回の試験結果ではモータのトルクが糸の摩擦力を上回り，空回りし値が一定になったことがわかる．

第四章　モータの製作

構想設計のエネルギー分析で説明したように今回使用するモータの出力は 27.78N 以上が必要である．また，今回使用するモータの内，値が決まっているものは相数と極数，スロット数，回転子の磁石の断面積，ロータに使われている珪素鋼から求められる電磁誘導係数までが一定である．また，自分で変更することができるのはモータの巻線の巻き数，巻線の断面積，電圧，電流である．この自分で変化させることのできる値のうち根本的なモータの値の変更に関わる値はモータの巻線の巻き数と断面積の 2 つの値である．特に，今回使用する巻線が直径 1mm であるため，1 巻当たりの断面積は約$0.79mm^2$となる．

4.1）　材料一覧

今回使用した材料は下の図 4-1 にあるとおりである．



左上から順に，
ボビン，ステータ，
エナメル線，六角ボルト，C リング，ベアリング，銅線（U，V，W），
コア，ロータ
である．

図 4-1　材料一覧

4.2）　モータの手作り工程

実際に今回は自分の手で巻線作業を行った．
まず，巻線を行う前にどれだけ巻けばいいのかを検討するために，計算を行った．
モータのコア部に使われるもののみをまとめたものが下の図 4-2，図 4-3 である．上がボビン，下がコアである．

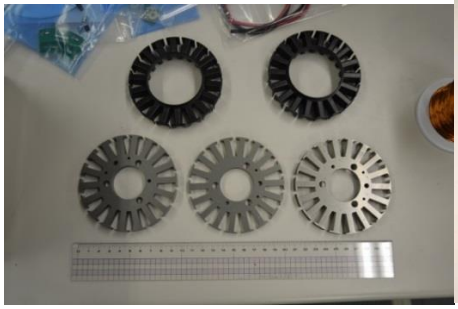


図 4-2　手巻きモータのコア部品

図 4-3　コアユニット

巻き線作業

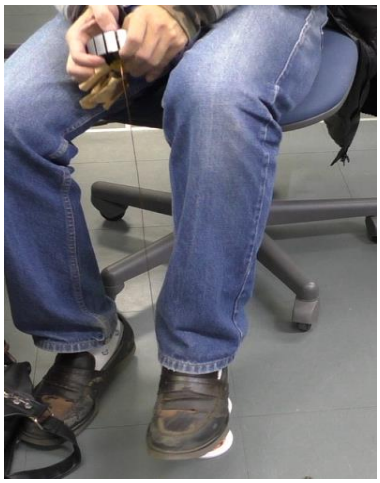


図 4-4 巻線作業

図 4-4 は，コアにエナメル線を巻いているときのものである．足でエナメル線の巻かれている芯を踏みながら巻く．コアにエナメル線を巻く際に重要なのは常にエナメル線が張りで線が伸びない程度の強さでエナメル線を張る必要がある．そのため，コアにエナメル線を巻く際はエナメル線が巻かれている芯を足で踏み，腰を使ってエナメル線にかかる張力をコントロールする必要がある

回転方向（時計周り＝CW，反時計回り＝CCW）

18 スロットの巻き線が完了すると図 4-5，図 4-6 のように 3 相駆動するので各巻き線を UVW と位置づけする．回転方向は巻き線の順序で決まり，今回は CCW で使用する．

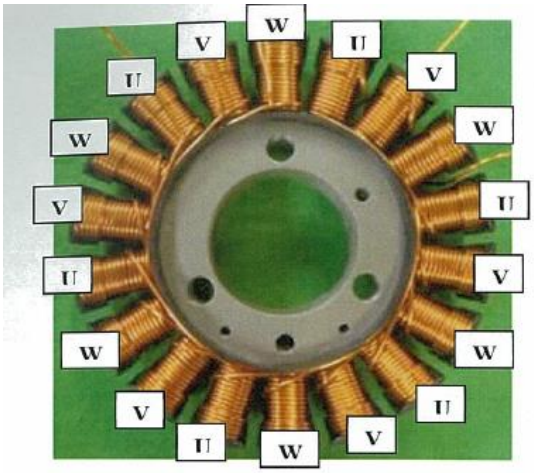


図 4-5　時計回り（CW）時

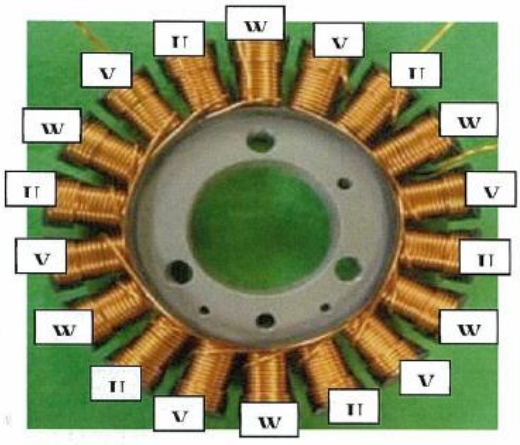


図 4-6　反時計回り（CCW）時

18 スロットの巻き線を組み合わせて最も相応しい結線を行う．今回は２直３相スター結線を使用した．違いを図 4-7 に示す．

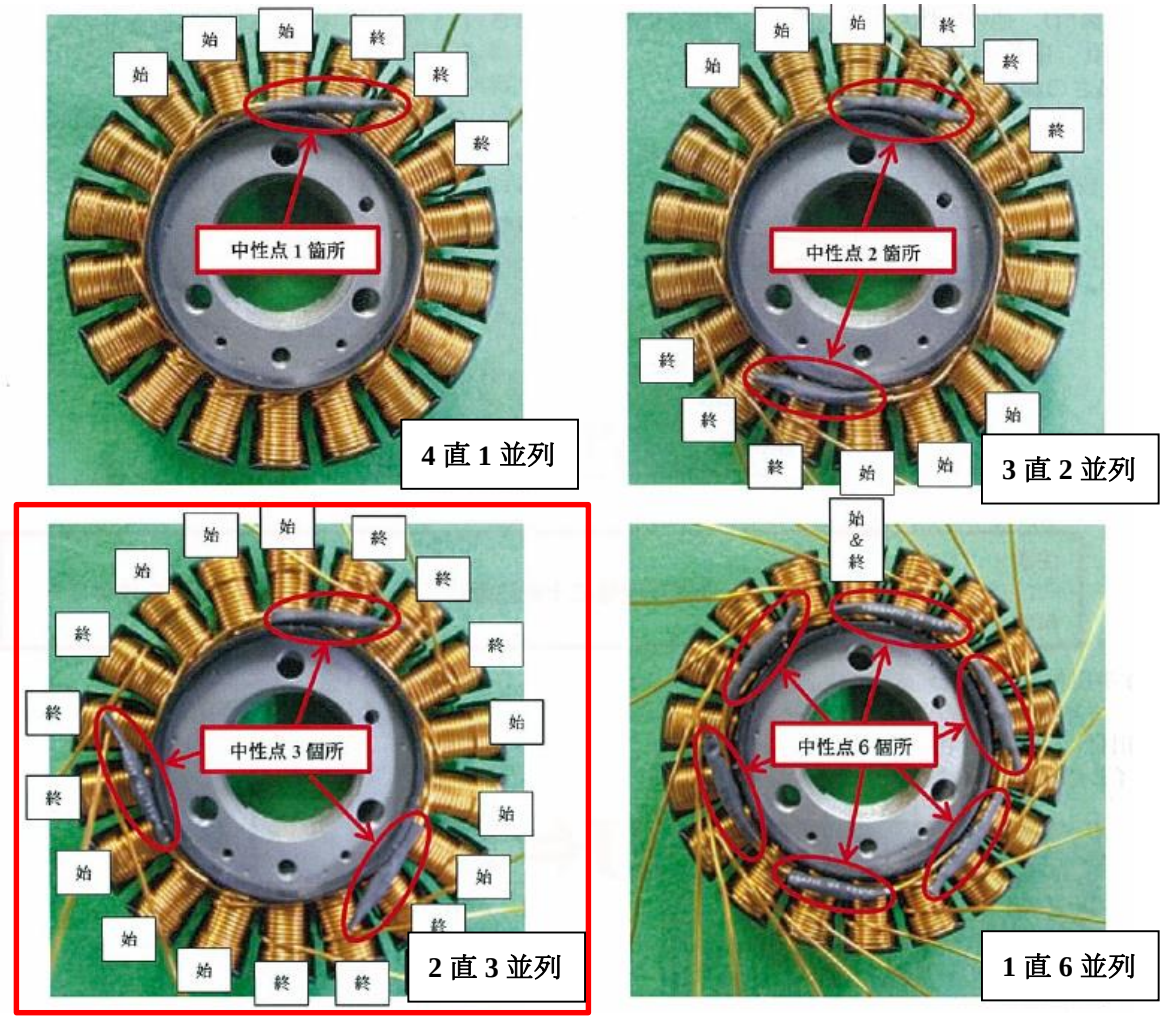


図 4-7　18 スロットの代表的な４結線例

今回採用した 2 直 3 並列スター結線時の結線を図 4-8 に示す．

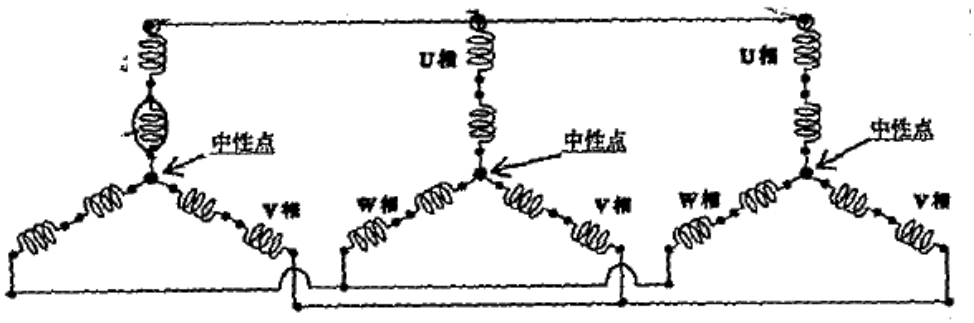


図 4-8　２直３並列　スター結線

モータの巻線が終了後，U，V，W，U の中線，V の中線，W の中線に分けて巻線を行う．この時，線を間違えるとうまく回転しない．巻線が巻終わり線を繋げたものが次の図 4-9 である．

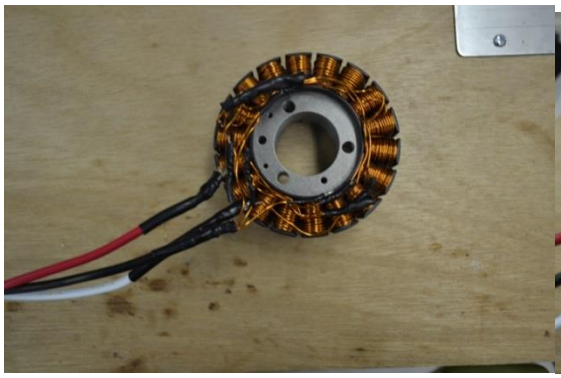


図 4-9　コア完成図

図 4-10　コアとステータ・ベース接続

その後，図 4-10 のようにモータのコアとロータを接続する．まず，コアとステータ・ベースを M6 ねじで繋げる．これを裏から見たのが次の図 4-11 である

図 4-11　コアとステータ・ベース　裏側

図 4-12　ステータ・ベースとベアリング

次にステータ・ベースにベアリングを接続する．ここではコアがあると分かりづらいため，コア抜きで撮影をした．また，ベアリングのうち，図 4-12 で表していない方向のベアリングは後のロータを接続後に繋げると楽に繋がるので今は接続しない．

この後，図 4-13 のようにコアとロータを接続する．この時，ロータの磁石とコアの珪素鉄が反応して強力な力が発生するため，十分に注意する必要がある．また，この時に先ほどのベアリングとロータの穴の大きさが同じなのでベアリングの穴に合わせると綺麗にコアとロータが繋がる．その後，接続を完了したのが次の図 4-14 となる．

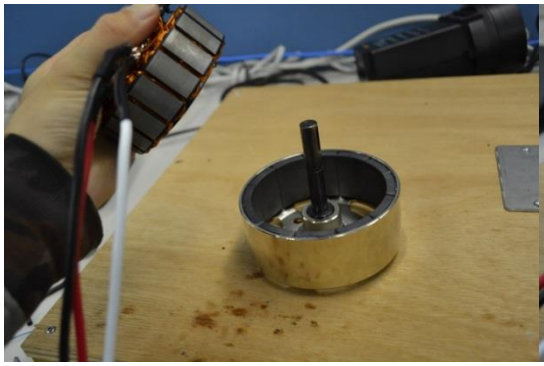


図 4-13　コアとロータ接続図

図 4-14　コアとロータ接続完了図

そして，上側のベアリングを装着後 C リングでベアリングを固定する．次の図 4-15 では C リングが上手くはまっている様子である．

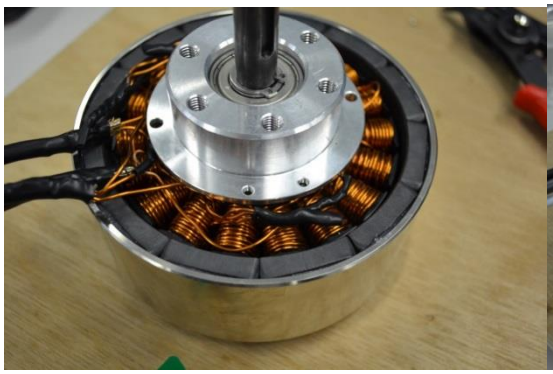


図 4-15　C リング

図 4-16　ホールセンサ取り付け

その後ホールセンサをステータ・ベースの下の穴に取り付ける．実際に取り付けた図が次の図 4-16 のようになる．

これでモータの完成である．最後にモータを自作した駆動実験台に取り付け回転実験を行った．

図 4-16　完成外観

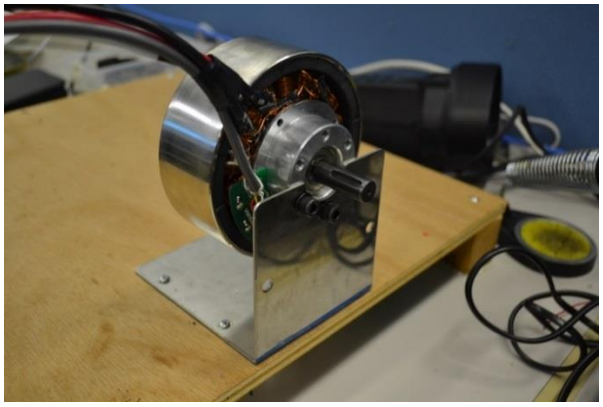


図 4-17　モータ単体の回転実験台

4.3)　ホールセンサユニット

３つの相に流す電流を順次切り替えるタイミングを磁界に反応するホールセンサによって検出する．図 4-18，図 4-19 は今回使用したホールセンサユニットで 3 つのホールセンサを 15 度間隔で配した構造になっている．ホールセンサの位置は，ロータ側の永久磁石の大きさで決まり，今回は 12 極であるため 15 度となる．

図 4-18　使用したホールセンサ

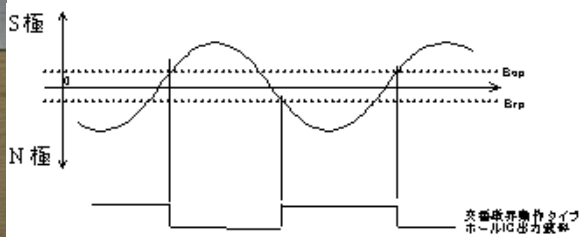


図 4-19　ホールセンサ　出力

4.4)　インバータ回路

マイクロプロセッサはホール素子からの 3bit 信号を受けてトランジスタに信号を送る素子である．基本となる動きを下の表 4-1 に掲載する．表 4-1 の 1 は High を表し，0 が Low を表す．また S1 から S3 は表 4-1 からわかるが U，V，W の電源側のトランジスタのスイッチングを，S4，S5，S6 がグランド側のスイッチングを行っている．

表 4-1　ホールセンサとスイッチングのタイミング表

回転角度　[度] ＼ 素子番号		1／4 回転分のタイムチャート（4 サイクルで 1 回転）					
		0	15	30	45	60	75
ホールセンサ	H1	1	1	1	0	0	0
	H2	0	0	1	1	1	0
	H3	1	0	0	0	1	1
出力側スイッチ	S1	1	1	0	0	0	0
	S2	0	0	1	1	0	0
	S3	0	0	0	0	1	1
	S4	0	0	0	1	1	0
	S5	1	0	0	0	0	1
	S6	0	1	1	0	0	0

このようにスイッチングをしている．また，S1 と S4，S2 と S5，S3 と S6 が同時に High に

なると回路がショートするため，絶対に行ってはいけない．

実際に使用したインバータ回路図を簡略化したものが図 4-20 である．

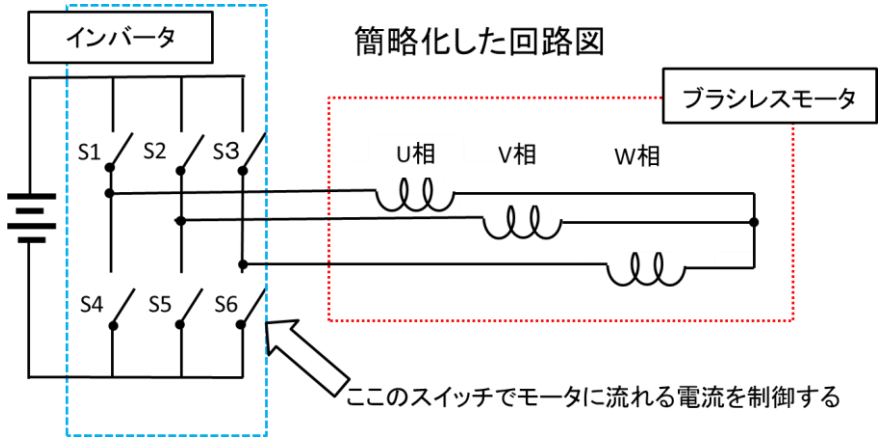


図 4-20　インバータ

DC24V，Max20A を切り替える素子として表 4-2 に示すパワーFET を用いた．

表 4-2　　使用したパワーFET

電流スイッチング素子	定格	備考
2SK3163 シリコン N チャネル MOSFET	VDSS＝60V ID＝75A	ルネサス エレクトロニクス社製
2SJ554 シリコン P チャネル MOSFET	VDSS＝-60V ID＝-45A	

＊VDSS：ﾄﾞﾚｲﾝ･ｿｰｽ電圧　　ID：ﾄﾞﾚｲﾝ電流

ブラシレスモータの回転速度を調整する方法は, PAM 制御と PWM（制御の 2 通りがあり，今回は PWM を実装した．

PAM 制御とは，下の図 4-21 のように DC モータと同じように，モータに送る電圧を変化させることで回転数を調整する方法である．これのメリットは素子の配置の仕方によっては入力電圧よりも高い電圧を発生する回路になり，高速回転を必要とするモータに使用される．また，常に電圧が監視されるため，モータや回路の保護機能を搭載しやすいものメリットとして上げられる．

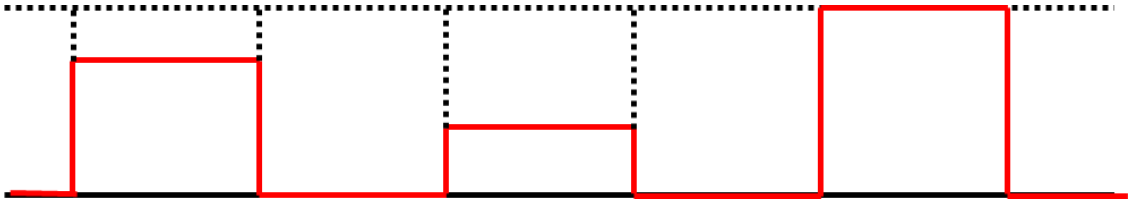


図 4-21　PAM 制御

PWM 制御とはトランジスタのスイッチングを単なる転流用としてだけではなく，電圧制御用として使用することができる．ブラシレスモータでは励磁期間を一定にすることで電圧を制御することが可能になる. On Off するパルス幅を可変にしているため PWM 制御と呼ばれる．メリットとしては，制御回路と同一の回路でも制御が可能になるため，回路が単純になる点である．次の図 4-22 では PWM 制御による電圧の変位を表している．

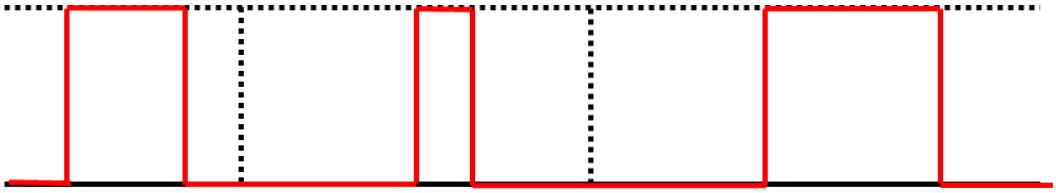


図 4-22　PWM 制御

第 5 章　制御基板回路構成と基板

5.1）概要

今回製作したマイコンボードでは主に MOSFET によるスイッチングが行われている．下の図 5-1 では回路の簡単な基本構成を図にしたものである. モータの回転をホールセンサで確認し，回転情報をマイコンに伝え，インバータでモータに回転に必要な電流の制御を行う．また，マイコン側とインバータ側では電圧が大きく異なるため，フォトカプラによって完全に分離している．

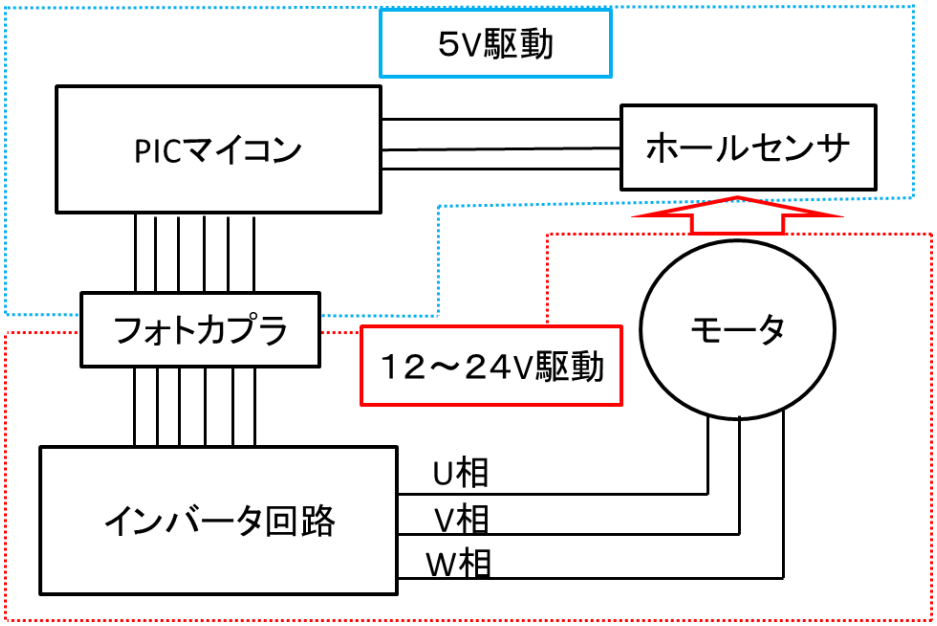


図 5-1　回路の基本構成

次に，PIC マイコンからモータまでの回路の詳細図を次の図 5-2 にかく．PIC マイコンから出た信号は LED を光らせ，フォトリフレクタに繋がる．また，インバータ回路は図 4-8 のように MOSFET で制御する．

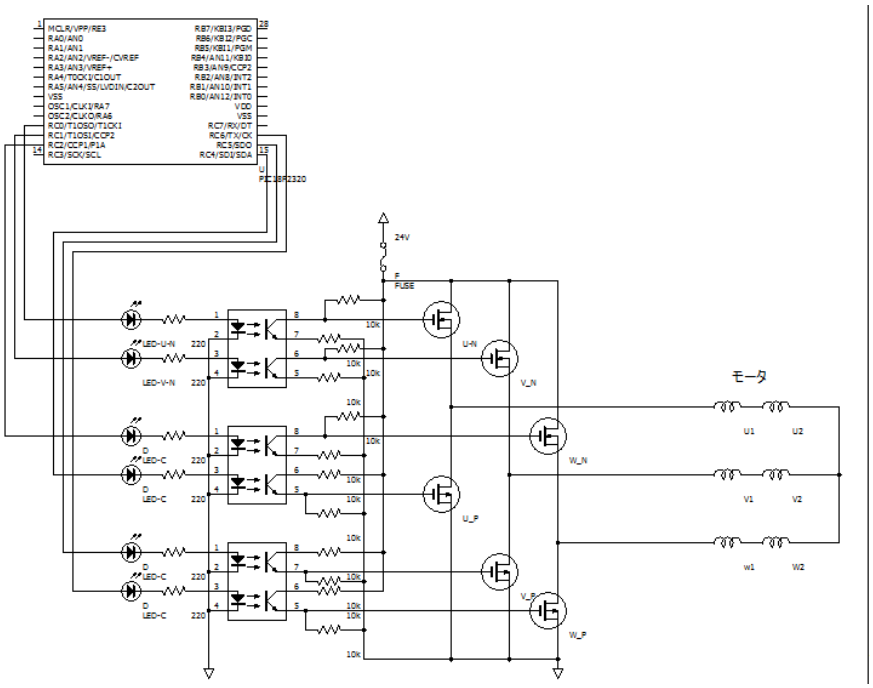


図 5-2　インバータ回路

5.2) 組み立てたプリント基板

実際に作成した基板が次の図 5-3 になる．

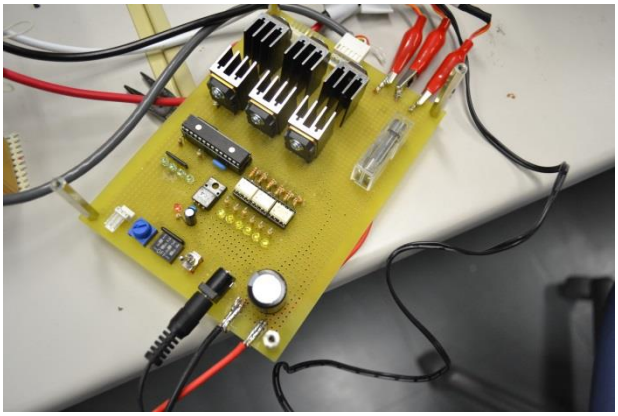


図 5-3　製作した回路

5.3) マイコンボードの機能と役割

今回製作した回路の中での働きを説明するために U 相のスイッチングの様子を図 4-8 で説明する.

S1 と S5 に電流が流れるときを考える．S1 は PIC で RC0 に接続される．また，この時，フォトカプラ（TLP521）の発光ダイオードが光り，電流がインバータ側に流れる．その時フォトリフレクタのところには電圧 12V が流れる.

また，フォトリフレクタは S1 が流れないときは 24V 電圧である．このため，電流が流れたとき，MOSFET（2SJ554）のドレイン電圧は(24-24)-（0-12）=-12(V)となり U 相に電流が流れていく.

次に S3 と S4 に電流が流れる時を考える．この時，RC1 からフォトリフレクタ電流がモータに流れる．このときフォトリフレクタのインバータ側の電圧は 12V になる．また，RC1 から電流が流れないとき，フォトリフレクタ側の電圧は 0V である．このため，電流が流れた時の MOSFET（2SK3163）のドレイン電圧は（0-0）-(0-12)=12V となり，U 相から電流が流れてくる.

5.4) 制御ソフトの機能

制御ソフトの働きは単純である. 主にホールセンサからの入力に対して表 4-1 の入出力を行っている．今回のプログラムを図 5-4 に示す.

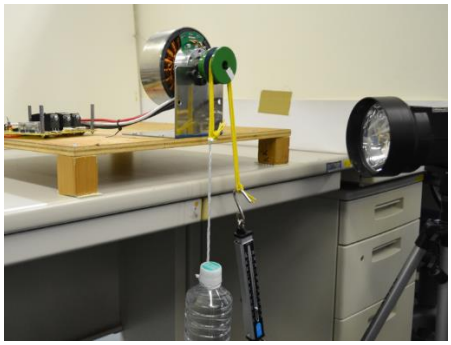
```
if (s==0x0c)                    // 起動回転無し PWM追加
{
    pb=0x00;

    for(;;)                 //無限ループ
    {
        pbb=pb;
        pb=PORTB & 0x70;    // ホールセンサの入力

        if (pbb!=pb)        // ホールセンサに変化があった
        {
            PORTC=0x00;     delay_us(10);   // デッドタイム回避

            SetChanADC(ADC_CH0);            // チャネル0選択
            ConvertADC();                   // 変換開始
            while(BusyADC());               // 変換終了待ち
            a0 = ReadADC();                 // データ読み出し(0-1023)
            a0 = a0 & 0x03ff;

            t1=(unsigned int)a0;
            t1=t1 >> 2;     // 0-255
            t0=255-t1;

            u=(unsigned char)(a0 >> 6);     // 0-15
            PORTA=~(u << 2);
        }

                if (pb == 0x50)         { PORTC=0x21;   }
            else if (pb == 0x10)        { PORTC=0x41;   }
            else if (pb == 0x30)        { PORTC=0x42;   }
            else if (pb == 0x20)        { PORTC=0x12;   }
            else if (pb == 0x60)        { PORTC=0x14;   }
            else if (pb == 0x40)        { PORTC=0x24;   }

                        delay_us(t1);
            PORTC=0x00;     delay_us(t0);
    }
}
```

図 5-4　ホールセンサを用いたプログラム

第 6 章　自作モータの性能試験

6.1)　DC モータの等価回路と静特性

　モータの等価回路は図 5-1 と考えられ，静特性は以下の様に算出できる．
自作モータは 200W クラスと大きいので実験には安全のため専用の実験台を自作した．
実験環境を図 6-1 に示す．DC 電源装置の最大出力電流が 3A のためトルク特性は
別途電池で行った．



DC 電源：菊水電気　Model:PAB32-3
最大定格 DC30V　3A
ストロボスコープ：　LINE-SEIKI
Model：SS-2000
ばね秤：1 Kg，10Kg
錘：200g　，500g（ﾍﾟｯﾄﾎﾞﾄﾙで代用）

図 6-1　試験台と測定風景

モータの最大効率トルクを求めるには，無負荷時と軽い負荷をかけた時の回転数の変化，その時の電流の変化から求めることができる．まず，M という定数を求める．

$$\mathrm{M} = \sqrt{(R_a + R_h)/R_a}$$

式　定数 M

ただし，この式は次式のように変換できる．

$$\mathrm{M} = \sqrt{(\Omega_0/I_0)(\Delta I/\Delta\Omega) + 1}$$

式　定数 M の簡単化

ただし，Ω_0は無負荷速度(rad/s)，Δ Ω は軽く負荷をかけたときの回転速度の変化分（rad/s），I_0は無負荷電流（A），ΔI は軽く負荷をかけた時の電流の変化分である．また，この時のモータの効率の最大値の式が以下の式になる．

$$\eta_{max} = (M-1)/(M+1)$$

式　最大効率

$$I^* = MI_0$$

式　最大効率時の電流

$$\Omega^* = \{M/(M+1)\}\Omega_0$$

式　最大効率時の速度

また，得られたデータが下の表 6-1 である．

表 6-1　データ

電圧(V)	トルク(kg)	電流(A)	回転数(rpm)
12	0	1.9	1085
12	0.5	3.0	900
24	0	2.9	1960

これを上の最大効率式に当てはめていく．結果，得られた値は次の表 6-2 にまとめられる．

表 6-2　手巻きモータの最大効率

トルク	最 大 効 率（%）	最大効率電流（A）	最大効率回転数（rpm）
0.5	0.34	2.55	726

6.2）　トルク性能試験

次の図 6-2 は性能試験として回転トルクの計測を行った．ここでは片方に重石をのせ，もう片方にばね測りを置いて，固定させた．これで，差分が測れるようになる．この時の写真を図 6-2 に示す.

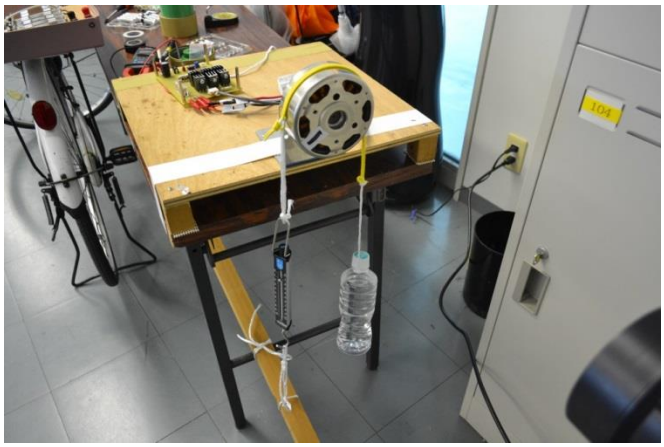


図 6-2　性能試験 2

これで安定して値を確認できるようになった．また，差分を確実に測れるため，トルク測定が成功した．実際のトルク測定の結果が下の表 6-3 である．重石の重さは 0.5kg 固定である．また，表 6-3 に W 数までの出力表を表す.

表 6-3　供給電力対トルクの関係

電圧[V]	電流[A]	投入電力	トルク[Nm]
13.9			0.68
16.7	6.5	108.6	1.24
19.1	8.9	170.0	1.58
21.7	10	217	2.25

電圧 13.9V 時の電流は値の計測をしていないため未記載とした.

以上の結果から当初から必要としていた出力が出ることが確認できた．また，回転数とトルクの関係が反比例するというモータの特性道理の結果が得られていることがわかる.

第 7 章　車体への取り付け

7.1) 構造設計

今回構造設計としては，ホームセンターで買えるものが中心となって極力自力で製作できるようにした．また，なるべく安価でも済むように木材の使用量が比較的多い．また，なるべく，適当な場所に機材をつけるために設計には自由度のあり，臨機応変に対応が可能なものにした．

7.2) 製作過程

製作中の写真から説明していく．
自転車側のプーリーを製作する．プーリーを製作するのに必要な部品を次の図 7-1 に表す．

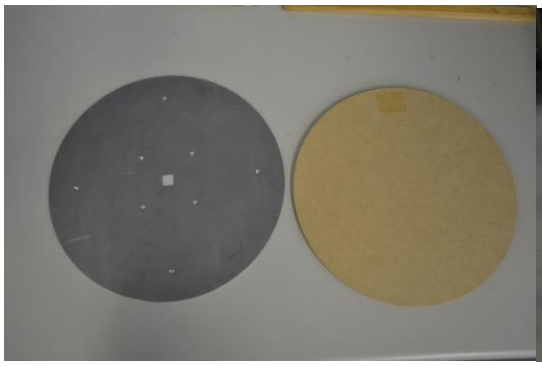


図 7-1　プーリー　部品

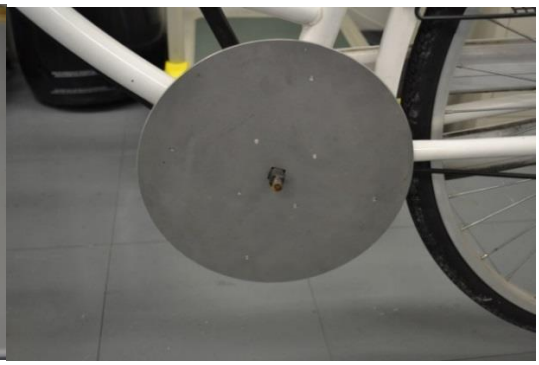


図 7-2　鉄板とシャフトの固定の確認

上の図 7-1 から左から順に 27cm 鉄板，26cm の木板である．このうちの鉄板は鉄工所様にお願いをして穴あけの作業をして頂いた．
また，モータから後部車輪に力が伝わるようにプーリーをシャフトに固定しなければならない．そこで図 7-2 のように鉄板でプーリーの外側を製作し，かつきちんとシャフトに固定されるか確認をしなければならない．
その後，プーリーの溝の深さを考慮するために V ベルトの仕様を確認した．これを図 7-3 で実際に使用したプーリーの説明書を付属する．
次に木板の加工作業に移る．まず，木板の中心をはかり，アタリ線を引く．次の図 7-4 ではアタリ線を引いている途中の図である．

図 7-3　V ベルト仕様

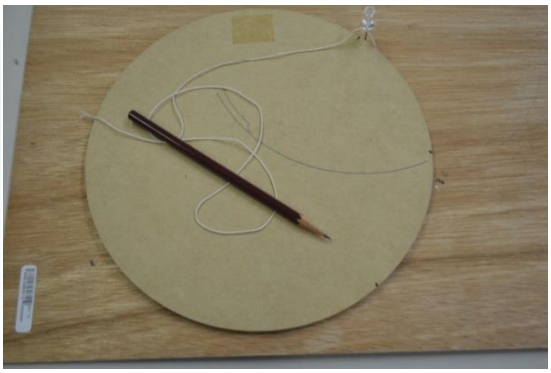


図 7-4　アタリ線

次にアタリ線から穴をあける位置を決め，線を引く．この時，鉄板の位置と同じであるか確認する．これを図 7-5 で示す．
その後，旋盤で穴をあけ，ボルトで固定する．この様子を図 7-6 に示す．

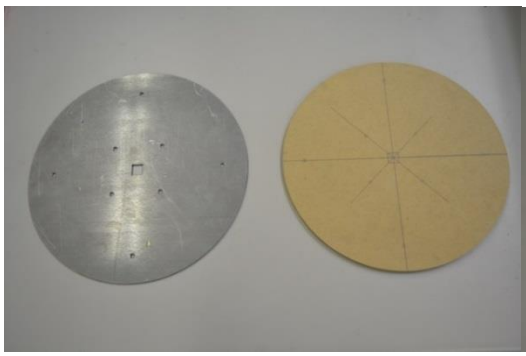


図 7-5　ボルト穴位置

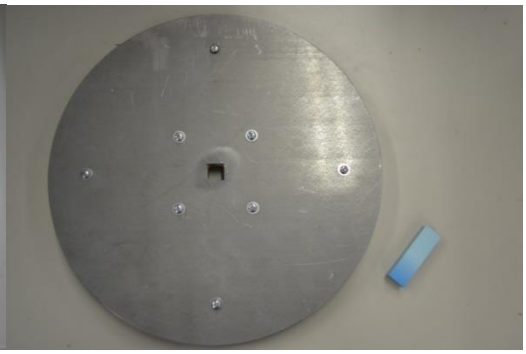


図 7-6　自転車側プーリー固定完了図

その後，図 7-7 からプーリーと V ベルトがかみ合っているか確認する．

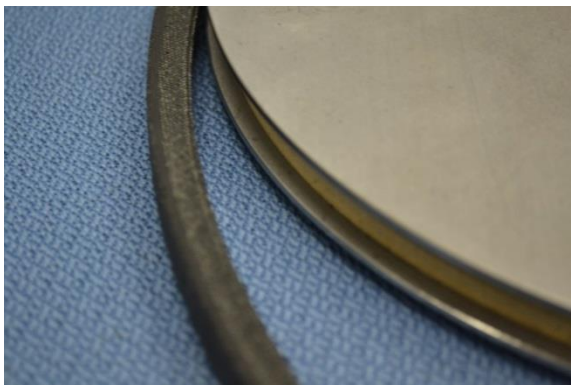


図 7-7　自転車側かみ合い確認

これで，自転車側のプーリーの製作が完了した．

モータ側は通販で購入した A 型プーリーをモータの軸経 12Φにあう様加工した．また，鉄板等の一部の作業は鉄工所に外注，キー溝加工も行った．結果を図 7-8 に記載する．

図 7-8　キー溝加工完了図

図 7-9　マシンキー

キー溝加工とはプーリーやモータで大きなトルクの動きでも，キー溝に入っているマシンキーがかみ合うことでモータのトルクを安定してプーリーに伝えることができ，駆動させることが可能になる．今回使用するマシンキーを図 7-9 に記載する．図 7-9 では大きさを比較するために六角レンチを下においてある．また，マシンキーには鉄鋼を使用することが多い．

また，マシンキーがせん断応力に負けないよう計算をする必要がある．今回は，モータの軸受に既にキー溝加工が施されているが，その軸受のサイズで十分マシンキーが機能を果たせるかの検証をする必要がある．

まず，マシンキーに必要な幅を求める．この式から最低でも必要なマシンキーの幅は次式で求めることができる．

$$\mathrm{b} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{D^2}{l} \cdot \frac{\tau_d}{\tau_\varepsilon}$$

式　マシンキーの幅

次にマシンキーに必要な高さを求める．マシンキーの圧縮抵抗 P（N）は次の式のようになる．式中の h はキーの平均高さ（mm），σ_εはキーに生ずる圧縮抵抗（N/mm^2）である．この式より，マシンキーの高さは次式で求めることができる．

$$\mathrm{h} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D^2}{l} \cdot \frac{\tau_d}{\sigma_\varepsilon}$$

式　マシンキーの高さ

この式を今回使用するマシンキー（2mm×2mm）に当てはめた結果，十分耐えられる結果になった．

またキー溝加工したプーリーと軸受が確実に固定されるか確認する．まず，図 7-10 のように軸受の軸穴にマシンキーを入れ，きれいに入るか確認する．

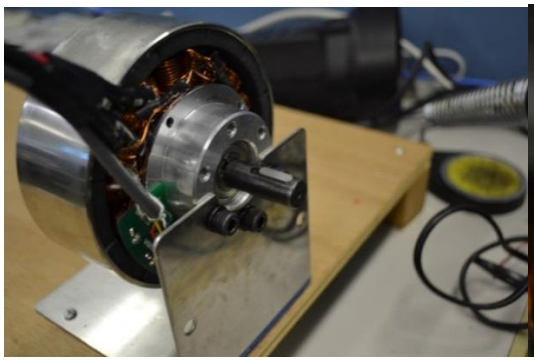


図 7-10　軸穴とマシンキー

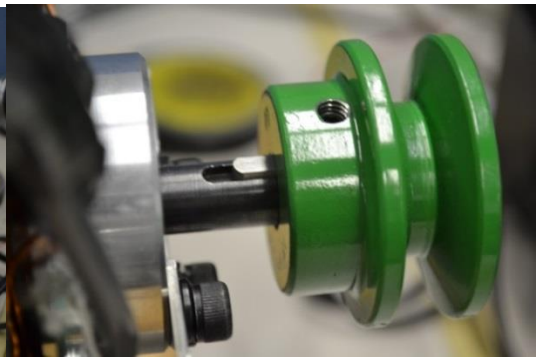


図 7-11　軸とプーリー

次に軸穴とマシンキーに合わせてプーリーを入れる．実際の様子を図 7-11 に記載する．
次に六角レンチでプーリーを完全に固定する．プーリーの穴にレンチを入れて固定する様子を図 7-12 に記載する．

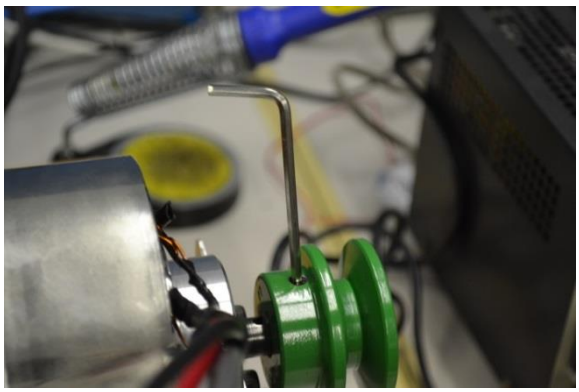


図 7-12　プーリーの固定

車体側モータ取り付け基盤
その後，図 7-13，図 7-14 のように木板を加工し，モータを載せられるようにする．

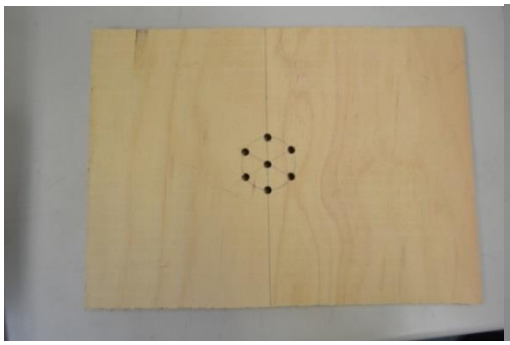


図 7-13　木板の加工 1

図 7-14　取り付けいた寸法確認

また，車体とモータの固定用の板を繋げるための別の板の寸法を測り，加工する．次の図 7-15 では取り付け用の板の寸法を取っている際の様子である．次に図 7-15 からモータを

取り付けている最中の様子を写真とともに紹介する．まず，モータ用のプーリーの取り付け位置の大まかな確認，そして車体と干渉しないかを確認する．

図 7-15　プーリー取り付け位置の確認

図 7-16　取り付け完了

図 7-17　プーリー取り付け完了　反対側

この板を加工して実際にモータとプーリーを繋げたものが次の図 7-16 となる．
これが車体と干渉していないことを示すため次の図 7-17 で反対側の様子を写真に示す．

その後，電装のチェックを行い，また，プーリーの取り付け木板に 5mm 厚ステンレス板を新たに取り付け強化した．モータを無負荷で，かつ安定化電源を用いて回転試験を行った．その後，バッテリーを載せて回転試験を行った． その後，図 7-18 のように前方にトルク変動用の可変抵抗と電源スイッチを新たに取り付けた．

図 7-18　可変抵抗と電源スイッチ

図 7-19　車体完成図

その後，スピードメーターを取り付けて完成である．図 7-19 に完成した写真を示す．

第 8 章　車体試験

8.1)起動トルク試験

起動トルク試験では自転車を固定し，モータが動くときにかかるトルクを調べた．次の図 8-1 では起動トルクの試験時の様子である．

図 8-1　起動トルク試験　全体像

この自転車を前輪と後輪両方とも固定する必要がある．実際に固定した様子を次の図 8-2, 図 8-3 に示す．

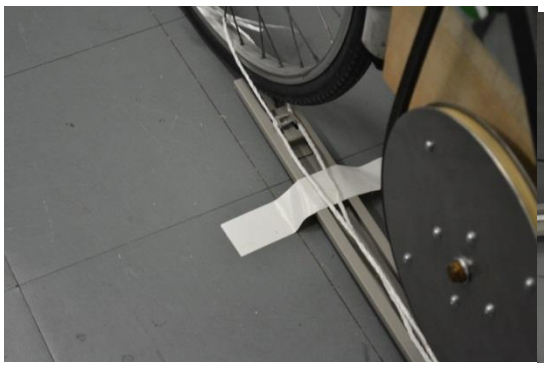


図 8－2　前輪固定

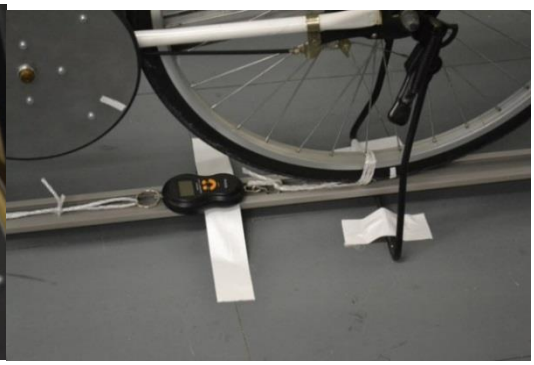


図 8－3　後輪固定

今回の計測結果を次の表 8-1 にまとめた．

表 8-1　起動トルク試験結果

電圧[V]	電流[A]	実測値[kg]	起動トルク[Nm]
22.2	30	2.00	6.53
18.8	32	0.50	1.63
13.3	26	0,25	0.82

このように，20V 前後で大きくトルクが変化している様子が分かる．また，この実験では使用した 20A ヒューズはすべて飛んだため．電流の値は正しいと推測される．

8.2） 走行試験

走行試験は野外で行った．走行試験は 12V，2 並列時，16V，2 並列時，20V，2 並列時の計 3 回行った．走行試験の内容はほぼ平坦な道 50m を走行し，時間を計測する．また電流，電圧を測り，速度との関係を出すことを目的としている．実際の走行試験の様子を下の図 8-4 に記載し，走行結果を表 8-2 にまとめた．また，50m の基準点に重石を置き，そこの間を計測した．

図 8－4　走行試験

表 8－2　試験結果

電圧	電流	平均速度	モータの回転数
12V	20A	4Km/h	43.7rpm
16V	20A	7km/h	76.4rpm
24V	30A	11km/h	120.0rpm

この結果から実際に走行したことが確認できる．また電圧を上げるにつれて，速度が上がるのも確認できる．しかし，電流の値を見ると電流の値が極めて大きく，バッテリーへの影響を無視できない．また，モータ単体との性能を比べても電流の値が大きいためモータにより大きなトルクを発生させており，モータの性能を十分に生かし切れていないことがわかる．

第９章　まとめ

9.1）評価と課題

モータ単体での性能については当初の性能を発揮することができた．一方で性能試験と比べても走行試験時でのモータにかかる電力が大きく，モータの性能を十分に生かし切れていない．これは駆動部でのギア比に問題がある可能性が極めて高いと推測される．これは回転試験時での回転数と走行試験時での回転数が大きく異なる点から見ても明らかである．また，制御基板についてもバッテリー保護の観点からも新たに改良を加える必要がある．

9.2）習得できたこと

今回の研究ではモータの性能，特性，から始まり，電動自転車の製作までを行い，最後に走行試験を行った．　これらの結果，200W クラスのモータの製作に成功し，また，車体のギア比は高めでありながらも電動自転車の走行に成功し，当初の目的は達成された．しかし，依然としてギア比が高く電流を大量に消費しているため，ギア比や制御基板，バッテリーへの対策で改良点が必要であることがわかった．

謝辞

今回の論文では様々な方の協力なしには完成させることはできませんでした．ここに深く感謝とお詫びを申し上げる．特に杉田先生と山本先生の指導抜きでは今回の論文を完成させることは不可能でした．また，ここまで支えてくれた家族や，友達にも感謝します．そして何度も指導して頂いた星野先生にも感謝の言葉しか出ません．本当にありがとうございました．

参考資料

[1]見城尚志　永守重信：メカトロニクスのための DC サーボモータ：合電子出版
[2]見城尚志　永守重信：新・ブラシレスモータ：総合電子出版
[3]トランジスタ技術　2014 年 11 月号：CQ 出版社
[4]日本電産 HP　モータとは http://www.nidec.com/ja-JP/technology/motor/
[5] EV-Bike　HP http://www.suzukacircuit.jp/ene1gp_s/
[6]日本自動車タイヤ協会 HP　転がり抵抗とは http://www.jatma.or.jp/labeling/faq01.html
[7]兵神装備株式会社　エンジニアブック http://www.eng-book.com/errata/pdf/eb17c06p092.pdf
[8] 採用したニッケル水素電池のスペック　http://panasonic.jp/battery/charge/evolta/
[9] インナーロータとアウターロータ　http://4-mini.net/column1_1-13-2.php